

Дослідження впливу комбінованої технології на довговічність деталей типу «вал»

Н. А. Мєдведєва, М. А. Левицький, В. Ю. Сухенко

Відновлення деталей типу «вал» при одночасному підвищенні їх ресурсу – важливий резерв розвитку та підвищення ефективності ремонтного виробництва. Підвищення зносостійкості та довговічності деталей сільськогосподарської техніки і машин є пріоритетним напрямком сучасного машинобудування. З цією метою виконаний аналіз та розглянуто процес електроконтактного зміцнення напилених зносостійких покриттів деталей типу «вал».

Проведені експериментальні дослідження фізико-механічних властивостей зносостійких покриттів, отриманих комбінованою технологією. Встановлені залежності міцності зчеплення, пористості напилених зносостійких покриттів від струму і тиску процесу електроконтактного зміцнення. Зі збільшенням тиску зміцнення до 30–40 МПа і сили струму до 14–16 кА спостерігається зростання міцності зчеплення напиленого покриття до 180...220 МПа та зниження пористості до 2...5 %.

Зносостійкість покриттів, отриманих за комбінованою технологією, у всьому діапазоні досліджених навантажень і швидкостей виявилася вищою, ніж у покриттів, отриманих окремо за класичними технологіями газополуменевого і електродугового напilenня. Найвищі показники зносостійкості виявлено у покриття з матеріалу ФМІ-2, отриманого комбінованою технологією.

Дослідження втомної міцності зміцнених деталей показали, що покриття отримані комбінованою технологією підвищили межу витривалості деталей, відновлених напilenням, на 20 %, а деталей без покриттів – на 50 %.

Проведена порівняльна оцінка фізико-механічних і експлуатаційних властивостей покриттів отриманих електродуговим, газополуменевим напilenням та комбінованою технологією. Встановлено, що застосування електроконтактного зміцнення напилених зносостійких покриттів при тиску 20...40 МПа, силі струму 11...16 кА, тривалості імпульсів струму і пауз 0,02...0,04 с, значно підвищилися їх фізико-механічні властивості та експлуатаційні характеристики.

Ключові слова: напilenі покриття, пористість, міцність зчеплення, зносостійкість, електроконтактне зміцнення, довговічність, витривалість, комбінована технологія, відновлення

1. Вступ

Головною причиною, яка зумовлює зниження надійності робочих параметрів машин, є знос деталей, що призводить до пошкодження поверхонь, втрати потужності і зменшення надійності і довговічності механізмів в цілому. У трибосопрязжених вузлах і агрегатах відбуваються механічні, фізичні,

електро-хімічні процеси, що викликають пошкодження і руйнування поверхонь тертя [1].

Швидкість зношування деталей змінюється в залежності від активності таких факторів, як тривалість та нерівномірність навантажувального і температурного режимів.

При виконанні капітального ремонту сільськогосподарської техніки частина деталей бракується через неприпустимий знос і відсутність технологій відновлення. Номенклатура таких деталей становить 22 % від кількості продефектованих деталей [1, 2].

За даними досліджень [1], знос поверхонь деталей тракторів, автомобілів і сільськогосподарських машин розподіляється наступним чином рис. 1.

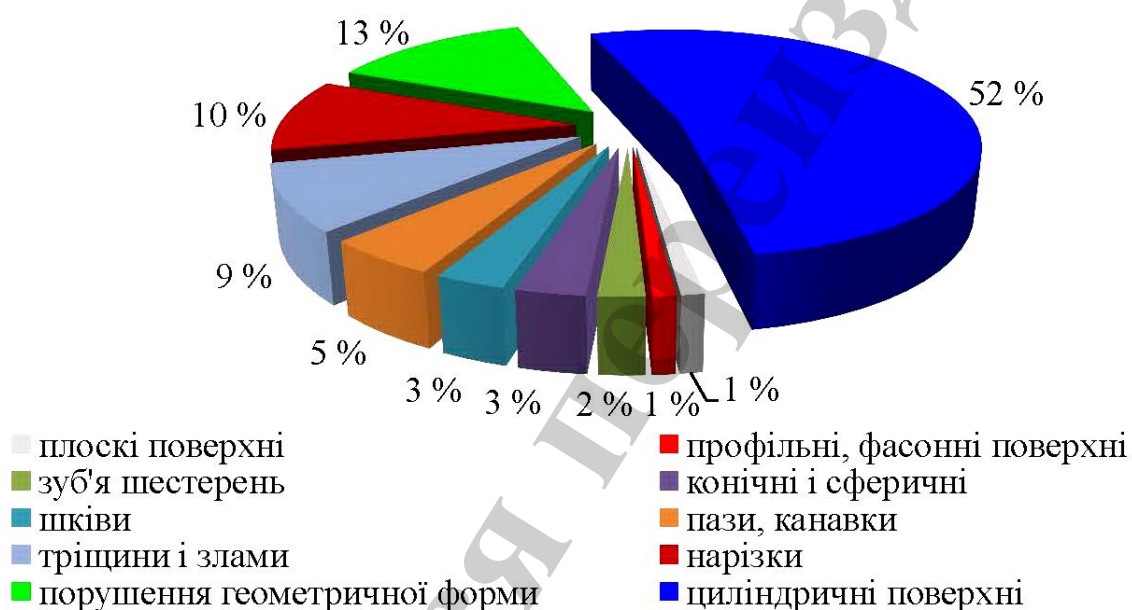


Рис. 1. Структура розподілу зношених поверхонь

Найбільшим сегментом у частині зношених поверхонь виявилась пара тертя «вал–втулка». Основними факторами, що визначають вид зношування деталей і робочих органів сільськогосподарської техніки, є середовище, динаміка і кінематика відносного переміщення пар тертя, характер контакту і властивості матеріалу деталі [3, 4]. Широкий розподіл деталей типу "вал" в вузлах техніки, різноманітність діючих сил і умов експлуатації визначають великий розкид в значеннях зносу їх робочих поверхонь (0,1–3,0 мм на сторону).

Зважаючи на те, що загальна частка циліндричних деталей сільськогосподарської техніки складає більше 50 %, проблема підвищення довговічності та надійності валів є дуже актуальною [1].

Ринок вимагає конкурентоспроможних технологій з низькою вартістю та складністю, які дадуть відчутний економічний ефект [5].

Покращення якості покриття методом електроконтактного зміцнення напилених поверхонь дозволить надати виробам підвищену зносостійкість, жаро-

стійкість, корозійну та втомну міцність за рахунок зміни структури матеріалу поверхні.

Використання комбінованої технології для відновлення деталей машин різними за складом матеріалів дозволить отримати певні ефекти від впровадження у виробництво, підвищити ресурс роботи відновлених деталей, навіть тих, які працюють в агресивних середовищах. За рахунок нанесення покриття товщиною більш 1 мм комбінованою технологією зменшити бракування деталей сільськогосподарської техніки через неприпустимий знос при виконанні капітального ремонту.

2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Існує багато технологічних методів впливу і керування складом, структурою і властивостями поверхневих шарів деталей. Проте, впровадження таких засобів у виробництво гальмується відсутністю науково обґрунтованих рекомендацій раціонального вибору способів зміцнення поверхонь деталей. Доцільно обирати способи модифікування поверхонь в залежності від виду зношування, його характеру, інтенсивності, характеристик робочих середовищ тощо [6].

Технологічні процеси гарячої обробки тиском, термообробки металів і сплавів включають операції високотемпературного нагріву. Як правило, при нагріванні поверхня металів і сплавів піддається окисленню, під дією кисню та температури вигорають легуючі компоненти, утворюється окалина [7, 8]. Це, в свою чергу, ускладнює застосування даної технології для відновлення деталей із значним зносом.

В останні роки розробляються електронно-променевий, іонно-променевий, іонно-плазмовий, вакуумний та інші методи. Проте дифузійні поверхневі шари, отримані вказаними методами ХТО, характеризуються підвищеною крихкістю, відносно малою глибиною дифузійного шару і великим терміном процесу насичення [8].

Нині відомий ряд методів підвищення міцності і зносостійкості поверхневих шарів деталей, однак їх застосування до вирішення зазначеної проблеми обмежена [9]. Наприклад, методи високоенергетичної іонної імплантації істотно збільшують собівартість покриттів, а глибина проникнення іонів, зазвичай, не перевищує 0,1–0,2 мкм.

Підвищення мікротвердості і зносостійкості забезпечується електронно-променевою обробкою (ЕПО) напилених покриттів [10]. Межа витривалості таких покриттів підвищується на 60–80 %, а міцність зчеплення – в 2,5÷3,5 рази. Лазерна і електронно-променева обробка забезпечують високу однорідність нагріву, селективність, дозволяють вести процес у важкодоступних ділянках. Недоліками технології є неоднорідність гетерогенної макроструктури поверхні, надмірне проплавлення та утворення мікротріщин, які поширювалися на глибину зони впливу [11].

Лазерне оплавлення [11, 12] напилених покриттів збільшує мікротвердість в 2 рази, зносостійкість в 1,3÷1,8 рази. Але при значних товщинах покриття виникає неоднорідність гетерогенної макроструктури поверхні та не забезпечується хімічне модифікування покриття.

Хіміко-термічна обробка характеризується великою тривалістю процесу і не дозволяє проводити обробку великогабаритних деталей. Так, наприклад, використання недорогих низьковуглецевих сталей в якості газотермічних покриттів з подальшим модифікуванням, зокрема, борування, підвищує зносостійкість покриттів з проволоки Св-08 при сухому терті в 10 разів [13]. Але, слід зазначити, що максимальна товщина нанесеного покриття за даною техеологією, не перевищує 1 мм.

Іонне азотування сталей 40Х13 і Х18Н10Т забезпечує мікротвердість від 6,5 до 15 ГПа в поверхневому шарі від 5 до 40 мкм. При цьому зносостійкість збільшується у 8 разів [14]. Недоліком способу є висока твердість азотованого шару, яка досягається за рахунок формування фаз, що в свою чергу, не дозволяють досягати високої адгезії між покриттям і дифузійним шаром.

Розглянуті вище методи створення зносостійких напилених покриттів послужили основою для впровадження технологічних процесів відновлення – зміцнення і підвищення терміну служби деталей сільськогосподарських машин та механізмів.

Однак застосування розглянутих вище методів створення зносостійких напилених покриттів обмежено через низку недоліків.

Зокрема, ЕПО призводить до неоднорідної гетерогенної макроструктури поверхні і не забезпечує хімічного модифікування. Високу зносостійкість, твердість та інші властивості електродугових (ЕДН) / газополуменевих (ГПН) покриттів можна забезпечити електроімпульсною обробкою [15].

Методи високоенергетичної іонної імплантації істотно збільшують собівартість покриттів [16].

Механічна обробка лазерним променем – це форма нетрадиційної механічної обробки, яка може обробляти практично будь-які відомі матеріали. Це термічний, безконтактний процес, який не викликає жодних механічних напружень у роботі [17]. Процес відрізняється мінімальними деформаціями деталей і підвищеною зносостійкістю поверхні. Недоліки обумовлені тим, що на метали з різними фізико-механічними властивостями впливає один лазерний промінь з конкретними параметрами потужності і щільності потужності. Це веде до того, що метали по-різному «реагують» на лазерний вплив.

Порівнюючи енергетичну ефективність і технічні показники різних технологій відновлення деталей машин і механізмів загальномашинобудівного профілю (деталі із сталей, чавунів, кольорових металів і їх сплавів), з огляду на вартість матеріалів, що використовуються при нанесенні покриттів, було встановлено, що одними з найбільш ефективних і економічних методів являються активоване газополуменеве напилення і гіперзвукова металізація [18]. Дані технології забезпечують досить високі механічні і адгезійні характеристики покриттів, проте здебільшого не достатком є невелика товщина імплантованого шару (до 15–18 мкм), обумовлена наявністю більшої кількості оксидів, а також малим раз мером розпорошених частинок (1–25 мкм).

Холодне розпилення було використано в якості перспективного методу твердотілого покриття в останнє десятиліття для масового виробництва високоякісних сплавів і/або металевих матричних композиційних покриттів [19].

Технологія дозволяє наносити покриття тільки з пластичних металів, а її недоліком є низька адгезійна міцність.

Використання дешевих і простих в реалізації методів газополуменового і електродугового напилення за традиційною схемою дає максимальну твердість покриттів 35–50 HRC, що не забезпечує відповідну зносостійкість [20]. Водночас, зі збільшенням товщини покриття зростають напруги на границі «основа–покриття», внаслідок чого знижуються міцнісні властивості системи, що призводить до відшарування покриття від основи.

Підвищення зносостійкості, твердості та інших поверхневих властивостей газотермічних покриттів товщиною понад 1 мм можна за рахунок електроконтактного зміцнення, що є досить високоефективним та економічним методом [21]. Даний метод дозволив створити комбіновану технологію, яка полягає у формуванні зносостійкого покриття газополуменовим і електродуговим напиленням з подальшим модифікуванням шляхом електроконтактного зміцнення. Електроконтактне зміцнення (ЕКЗ) не дозволяє напиленому матеріалу досягти температури плавлення, що відкриває широкі можливості в створенні захисних покриттів з високими фізико-механічними і експлуатаційними властивостями.

3. Мета та завдання досліджень

Метою роботи є раціональний вибір технології та обґрунтування використання електроконтактного зміцнення напилених покриттів для відновлення деталей сільськогосподарської техніки типу «вал» із зносом більше 1 мм.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі:

- дослідити вплив параметрів електроконтактного зміцнення на фізико-механічні властивості покриттів, отриманих комбінованою технологією;
- визначити інтенсивність абразивного зношування напилених покриттів до та після їх електроконтактного зміцнення;
- визначити втрату міцності (витривалість) матеріалів з покриттями та без покриття;
- порівняти властивості зносостійких покриттів, отриманих напиленням та покриттів, отриманих комбінованою технологією.

4. Матеріали і методи досліджень комбінованої технології на довговічність відновлених деталей

4. 1. Досліджувані матеріали та обладнання, що використовувались в експерименті

Для досліджень використовувалися твердосплавні порошки ПГ-С1 і порошковий дріт ФМІ- 2.

Самофлюсуючі порошки на залізній основі, ПГ-С1 (ГОСТ 21448-75), випускаються Торезьким заводом наплавлювальних твердих сплавів. Хімічний склад порошку наплавочного твердого сплаву ПГ-С1: Fe-основа; Cr – 28,7 %; C – 3,17 %; Si – 3,2 %; Mn – 0,7 %; Ni – 3,5 %; P – 0,04 %; S – 0,04 %; розмір часток 63, 169, 315 мкм; температура плавлення 1270 °C; середнє значення мікротвердості – 8000 ГПа; середній питомий електроопір порошку при T=293 K – $2,5 \cdot 10^{-7}$ Ом·м.

Порошкові дроти марки ФМІ-2 діаметром 1,8 мм, (ТУ 03534506–001–95 "Дріт порошковий для електродугової металізації"). Дріт розроблений ФМІ НАН України і виготовлений підприємством "Іскра" м. Дубровиці Рівненської області (Україна). Дріт складається з оболонки – стрічки зі сталі 08кп товщиною 0,4 мм з порошковим шихтою. Використовувалася шихта на основі ФХ + Al. Як ферохрому вуглецевого використовувався порошок ФХ 800 ГОСТ 9849–74 (73 % Cr; 8,3 % C; інше – Fe). Як алюміній використовувався порошок ПА–40 (99,3 % Al).

Доцільність вибору цих матеріалів для досліджень пов'язана з їх складом і спроможністю значно підвищувати зносостійкість, твердість та інші властивості газотермічних покриттів [22]. Значний вміст в цих матеріалах хрому дозволяє підвищити корозійну стійкість та адгезію покриття. При напilenні хром практично не вигорає.

Особливістю комбінованої технології є те, що на умови формування зміцнених електроконтактних зміцнень напilenних покриттів не адитивно впливають конструктивні особливості установок для електроконтактного зміцнення і напilenня, технологічні параметри, характеристики матеріалів. Основним недоліком комбінованих способів нанесення покриттів і багатоопераційних технологій є необхідність різнопланового обладнання. Схематично процес комбінованої технології напilenня та подальшого електроконтактного зміцнення зображений на рис. 2.

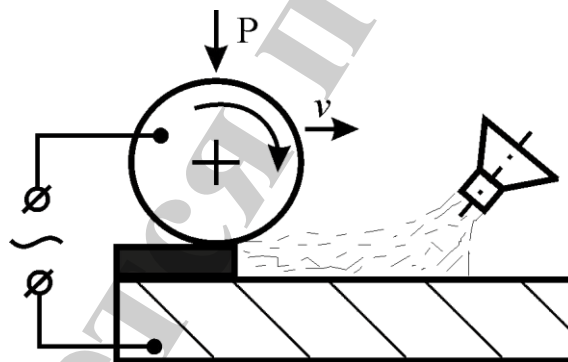


Рис. 2. Схема процесу газотермічного напilenня і подальшого електроконтактного зміцнення

Для електродугового напilenня використовувалося обладнання, розроблене Фізико-механічним інститутом НАН України (м. Львів, Україна). Металізатор ЕМ-14 монтується на супорті токарно-гвинторізного верстата 16К20.

Устаткування для електродугового напilenня характеризується наступними параметрами: напруга – 18...36 В, сила струму – 50...600 А, потужність дуги – 5...20 кВт, відстань від сопла до робочої поверхні – 50...200 мм, швидкість позовжнього переміщення металізатора – 5...10 мм/об, частота обертання валу – 0...60 об/хв, тиск стисненого газу – 0,35...0,5 МПа, витрата газу – 60...150 м³/год, діаметр дроту 1,6...2,0 мм, швидкість подачі дроту – 0,05...0,35 м/с.

Процес газополуменового напilenня здійснювався на установці УПТР–90, розробленої Державним науковим закладом «Об'єднаний інститут машинобу-

дування» Національної академії наук Білорусі. Установка УПТР-90 характеризується наступними параметрами: об'єм порошкового живильника $0,006 \text{ м}^3$, розмір часток основної фракції – $40...120 \text{ мкм}$, дистанція напилення – $100...350 \text{ мм}$. Витрата газів: кисень, ацетилен, пропан-бутан, технічний газ складає $1,0...4; 0,7...2,0; 0,2...1,5$; до $2 \text{ м}^3/\text{год}$ відповідно, робочий тиск газів: кисень, ацетилен, пропан-бутан, технічний газ: $0,1...0,4; 0,07...0,11; 0,03...1,0$; до $0,2 \text{ МПа}$.

Максимальна продуктивність при напиленні – $1,1...10 \text{ кг/год}$; коефіцієнт використання матеріалу – 98% .

Зміцнення напилених покриттів і дослідження процесу електроконтактного зміцнення проводилося на установці для контактної наварки стрічки 011–01–2, яку розроблено Всесоюзне науково-виробниче об'єднання «Ремдеталь», Росія. (рис. 3).

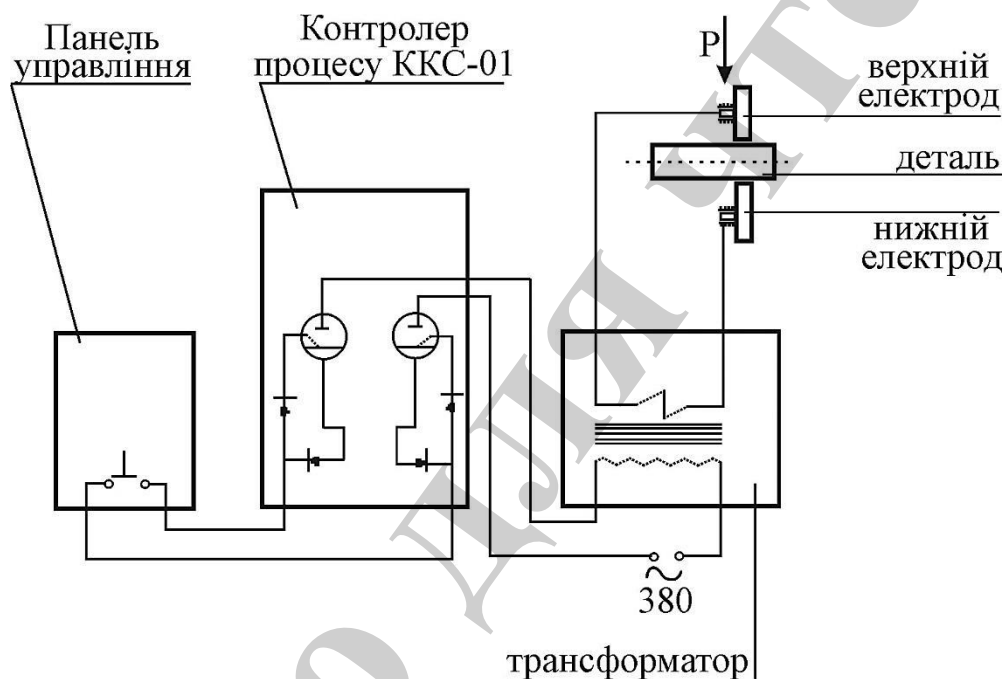


Рис. 3. Принципова електрична схема установок для електроконтактного зміцнення

Установка працює в напівавтоматичному режимі і включає наступні основні вузли: пристрій для обертання, привід подачі, візок з наплавочною головою, стійку, пневмопіноль, панель управління, систему охолодження і пневмозабезпечення. Зміцнення напиленого шару здійснюється точками що перекриваються за допомогою регульованих імпульсів струму. Електроди для експериментальних досліджень виготовлялися з міді МЗ ГОСТ 859-78.

У процесі зміцнення одночасно відбувається загартування шару та охолодження, в процесі якого зразок практично не нагрівається. Технічна характеристика установки і її параметри наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Параметри установок для електроконтактного зміцнення

Найменування параметру	Величина параметра
Первинна напруга, В	380
Вторинна напруга, В	3,3...6,6
Первинний струм, А	100...450
Сила струму зміцнення, кА	8...30
Продуктивність, см ² /хв	до 120
Найбільше зусилля на електроді, кН	1...3
Ширина верхнього електрода, мм	8...16
Тривалість імпульсу струму зміцнення, с	0,02...0,04
Тривалість паузи, с	0,02...0,04
Частота обертання шпинделя, об/хв	0,6...1,5
Швидкість переміщення каретки, м/с	1,5...75 $\cdot 10^{-4}$
Товщина покриття, мм	0,15...3

Процес електроконтактного зміцнення напилених покриттів забезпечується спільною дією на порошковий шар високої температури (яка не перевищує 0,8...0,95 температури плавлення основного компоненту) і тиску. ЕКЗ характеризується високими швидкостями нагрівання (до 100 тис.°С/с), при цьому можуть застосовуватися постійний або змінний електричні струми силою до 25...30 кА і напруги 1,5...6 В.

4. 2. Методики вимірювання технологічних параметрів процесу електроконтактного зміцнення напилених покриттів

Вторинна напруга і величину струму зміцнення реєстрували шлейфового осцилографом Н-701.1 ОАТ "Мінський завод "КАЛІБР" (Білорусь). Градування шлейфа по напрузі проводили вольтметром типу Д574 (клас точності 0,2) з межами 0–7,5 В. Для реєстрації на стрічку осцилографа струму зміцнення застосовувався шунт, в якості якого використовувалося одне із колін струмопідводу верхнього електрода установки. Для виключення впливу індуктивності на точність виміру застосовувався шунт з великим відношенням індуктивного опору до реактивного. У порожньому струмопідводі зроблена виточка малого перетину і калібрована ділянка, що має опір 30 мкОм. підключалась кабелем до гальванометру осцилографа. При цьому напруга, що знімається з шунта була пропорційна до записаного струму і, практично, співпадала з ним по фазі. Внутрішнє охолодження струмопідводу дозволило виключити вплив температури на процес осцилографування електричного струму.

Тарування кривої струму проводилася шляхом прямого вимірювання амплітудного значення струму в імпульсі за допомогою електронного амперметра АСЦ-1М. Величина електричного струму у вторинному ланцюзі проводилася на спеціально тарованому вольтметрі типу ЕЗ-78 трансформатором струму. Температуру отриманих покриттів вимірювали за допомогою термоелектричних

перетворювачів ТХА-2088 (ГОСТ 3044-97) НПК "Еталон" (Росія) з діаметром дроту 0,3 мм, які зачеканюють безпосередньо на поверхні закріпленого зразка, а дані фіксували осцилографом Н-071.1.

Для вимірювання температури поверхневого шару покриттів спай термopари розміщували у циліндричному заглибленні 0,3...2 мм, щоб зменшити тепловий потік в покритті. При проведенні замірів температур в процесі і з метою згладжування наводок струму зміцнення в ланцюг кожної термopари включався блок індуктивно-ємнісних фільтрів. Він складався з конденсатора 2000 МКФ та дроселя з активним опором 1250 Ом, індуктивністю 1,2 Гн.

4. 3. Методики вимірювання фізико-механічних властивостей покриттів

Міцність зчеплення покриттів з основним металом при нормальному відриві проводили штифтовою методикою на розривній машині Р-20 Завод випробувальних приладів і обладнання "ЗІПО", Росія. Випробування покриттів здійснювали на вдосконалених зразках, у яких штифт і отвір в шайбі мають форму конуса. Така форма штифта, поряд з виключенням впливу сил тертя, зменшує зазор в сполученні і підвищує точність вимірювання.

Міцність зчеплення шару з основою $\sigma_{зч}$ визначали за формулою:

$$\sigma_{зч} = \frac{F}{S},$$

де F – навантаження, при якій стався відрив, Н; S – площа активної поверхні штифта, мм²;

$$S = \pi \cdot \frac{D^2}{4},$$

де D – діаметр активної поверхні штифта, $D=4$ мм.

Пористість визначали планіметричним методом металографічного аналізу (ГОСТ 18898-73). Спосіб дозволяє оцінювати розподіл пор за об'ємом покриття, визначити форму пори та її розміри.

Проведення досліджень на втомну міцність виконували з використанням експериментально – розрахункової методики та установки У-10, розробленої Інститутом проблем міцності ім. Г. С. Писаренко НАН України [23].

В якості зразків використовували стандартні круглі зразки діаметром 5 мм, на робочу частину яких наноситься газотермічне покриття. Для порівняння використовували 3–5 зразків без покриття і стільки ж – з покриттям. Випробування проводили протягом 100 годин при граничній для покриття температурі. Розрахунок зусилля розтягування проводять без урахування товщини покриття, так як міцність покриття на порядок нижче міцності основного матеріалу.

Магнітострикційна установка працює на принципі резонансу з частотою близько 10 кГц. Загальним положенням, яке лежить в основі ефективної роботи

подібних установок, є необхідність забезпечення руйнувань від втоми зразків, які досліджуються, при мінімальних енергетичних витратах.

Робоча частота установки (рис. 4), при якій можливо її використання для втомних випробувань, знаходиться приблизно в межах $9,8 \div 10,8$ кГц.

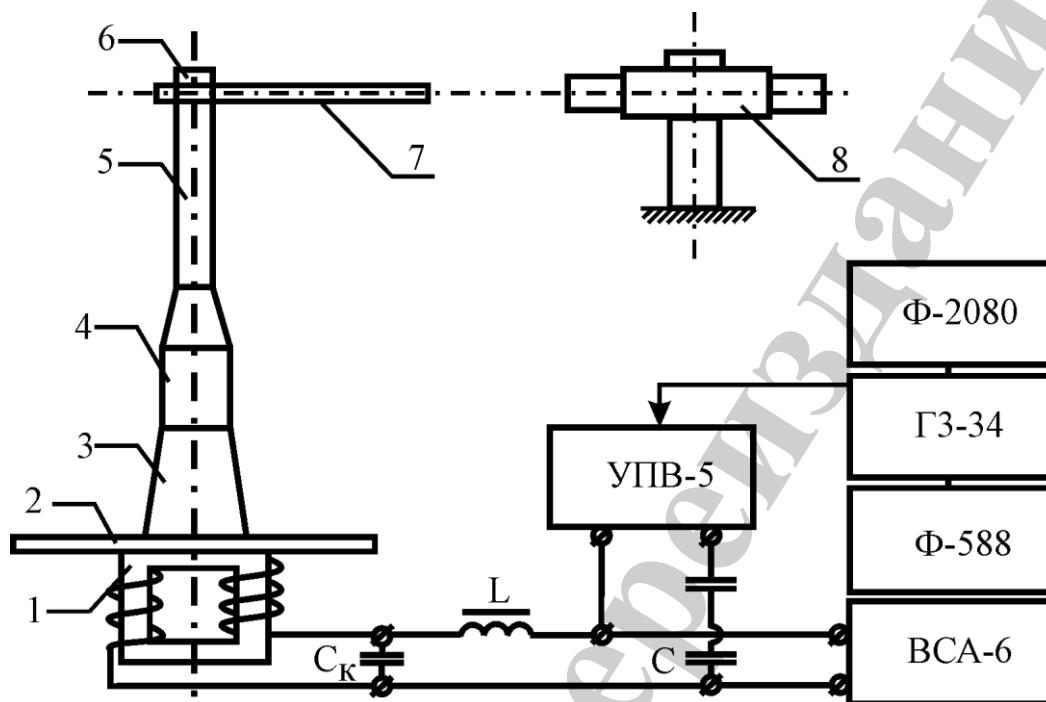


Рис. 4. Блок-схема магнітострикційної установки: 1 – вібратор;
2 – концентратор; 3 – фланець; 4 – накидна гайка;
5 – напівхвильовий концентратор; 6 – гайка; 7 – зразок; 8 – мікроскоп

Принцип дії вібратора 1 заснований на використанні явища магнітострикції, що полягає в здатності деяких матеріалів змінювати свої лінійні розміри під дією змінного магнітного поля. Магнітострикційний ефект реалізується використанням О-образних нікелевих пластин товщиною 0,1 мм, зібраних в пакет, який утворює вібратор 1. Змінне магнітне поле вібратора створюється пропусканням через його обмотку змінного струму, частота якого дорівнює робочій частоті установки; обмотка служить також для збудження в пакеті постійного магнітного потоку.

Для збільшення амплітуди застосовується концентратор 2 – напівхвильовий стрижень змінного перетину з фланцем 3, розташованому в вузловому перерізі стрижня. Діаметри торців концентратора 2–24 мм і 120 мм.

Електрична частина установки складається з генератора типу ГЗ-34, лічильника циклів Ф-588, частотоміра Ф-2080, джерела постійного струму – випрямляча ВСА-6.

Необхідна амплітуда коливань зразка 7, що закріплюється на торці концентратора 5 за допомогою гайки 6, встановлюється шляхом зміни вихідної напруги звукового генератора, що подається на потужний підсилювач.

Узгодження вихідного трансформатора потужного підсилювача УПВ-5 з вібратором застосовувалось шляхом підбору оптимальної кількості витків об-

мотки вібратора за умови отримання максимальної амплітуди коливань вібратора. Включення дроселя L і ємності C так, як показано на рис. 4, допускає паралельне з'єднання потужного підсилювача, джерела постійного струму і обмотки вібратора. Ємність C_k включається паралельно обмотці вібратора, так що в контурі " C_k – індуктивність вібратора" має місце резонанс струмів. Цим самим поліпшуються умови узгодження вібратора з потужним підсилювачем. Сили струму підмагнічування задавалися величиною 15А при напрузі 2–3 В. Для вимірювання амплітуди коливань зразка 7 в процесі випробувань використовується мікроскоп 8 з набором об'єктивів і окулярів. Змінюючи амплітуду коливань, при певній кількості циклів навантаження встановлюється необхідний для втомного руйнування зразків рівень напружень.

4. 3. Методики вимірювання абразивного зношування покриттів

Випробування на абразивне зношування покриттів проводили з використанням не жорстко закріплених абразивних частинок за стандартом ГОСТ 23.208-79, який збігається з американським стандартом ASTM C 568.

Цей метод використовується для випробування на зношування матеріалів, що мають високу твердість. Суть методу полягає в тому, що при однакових умовах відбувається тертя зразків по абразивних частинках, які подаються в зону тертя і притискаються до зразка гумовим роликком. Вимірюють знос зразків без покриття, з напиленим покриттям і покриттям, отриманим з використанням комбінованої технології (рис. 5).

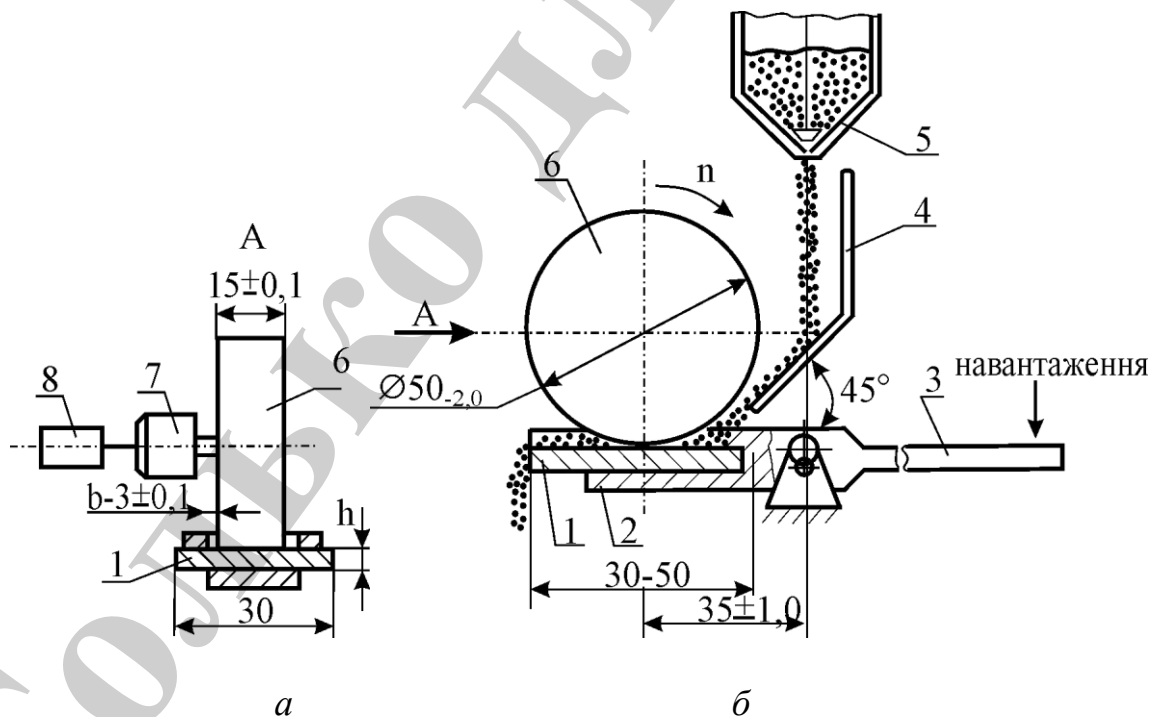


Рис. 5. Схема установки на абразивне зношування: а – вид збоку; б – зовнішній вигляд установки: 1 – зразок; 2 – тримач зразків; 3 – важіль; 4 – направляючий лоток; 5 – пристрій, що дозує подачу абразивних частинок; 6 – гумовий ролик; 7 – привід; 8 – пристрій контролю кількості обертів

Дослідження проводять на випробувальній установці, що містить привід 7, який забезпечує обертання навколо горизонтальної осі гумового ролика 6. Тримач зразків 2, важіль 3, притискає зразок 1 до ролика, пристрій 5, дозує подачу абразивних частинок в зону тертя по направляючому лотку 4. Пристрій 8 слугує для контролю сумарної кількості обертів ролика 6.

Діаметр ролика повинен бути в діапазоні 48–50 мм, ширина ролика – $(15 \pm 0,1)$ мм, твердість матеріалу ролика – 78–85 од. по Шору.

Твердість абразивних частинок повинна перевищувати твердість матеріалу не менше ніж в 1,6 раз, тому абразивним матеріалом слугував електрокорунд зернистістю 16-П по ГОСТ 3647-80 з відносним вмістом вологи не більше 0,15 %.

Знос випробовуваних і еталонних зразків визначають шляхом зважування до і після випробувань з похибкою не більше 0,1 мг. Вимірювання величини зносу зразків здійснювалося ваговим методом з використанням аналітичних ваг АДВ-200М. Шлях тертя – 1000 м. Втрата маси зразка внаслідок зношування при випробуваннях повинна становити не менше 5 мг.

5. Результати досліджень властивостей досліджуваних покриттів

Дослідження фізико-механічних властивостей матеріалів з покриттями дозволяє об'єктивно прогнозувати поведінку деталей при експлуатації, впливати на ресурс роботи, змінюючи склад, структуру, керуючи технологією отримання покриттів.

На зразки зі сталі 45 діаметром 20 мм і товщиною 40 мм наносились покриття з матеріалів ПГ-С1 та ФМІ-2 шляхом напилення. За допомогою установки 011-01-2 проводилось електроконтактне зміцнення із варіюванням технологічних параметрів, а саме, сили струму та тиску. Тривалість імпульсів току та пауз складала 0,02 с. Кількість вимірювань у кожному досліді при визначенні міцності зчеплення та пористості дорівнює трьом. Побудова графіків залежності пористості та міцності зчеплення покриттів від сили струму й тиску на електродах здійснювалась за середньоарифметичними значеннями.

В результаті проведених експериментальних випробувань встановлено залежності міцності зчеплення, пористості, зносостійкості від технологічних параметрів процесу зміцнення (сили струму, тиску). Значне зниження пористості напилених покриттів після електроконтактного зміцнення в порівнянні з ефектом газополуменевої обробки пояснюється позитивною роллю механічного фактору. Аналіз досліджень показав, що тиск ЕКЗ, в умовах впливу високих температур, визначає розвиток пластичних деформацій, які сприяють «заліковуванню» пор (рис. 6).

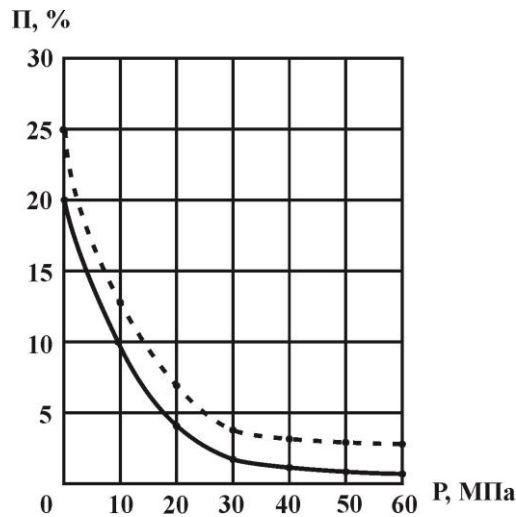


Рис. 6. Залежність пористості напilenого покриття від тиску зміцнення при силі струму – 16 кА, тривалості імпульсу струму зміцнення та пауз – 0,02 с:
1 – ПГ-С1; 2 – ФМІ-2

Взаємодія матеріалів у твердій фазі активується не тільки температурою, але і тиском. При цьому для істотного прискорення взаємодії матеріалів при високих температурах потрібно дуже низький тиск, який ініціює спрямований рух структурних дефектів.

Збільшення тиску зміцнення до 30–40 МПа викликає зростання міцності зчеплення напilenого покриття, але подальше його збільшення призводить до зниження міцності зчеплення. Це обумовлено недостатньою температурою спікання покриття, виникнення мікротріщин, і як наслідок, зменшення його міцності при підвищенні тиску (криві 2, 3, рис. 7). Аналогічні залежності у даному дослідженні простежуються на прикладі покриття з порошкового наплавочного сплаву ПГ-С1 і при використанні порошкового дроту ФМІ-2.

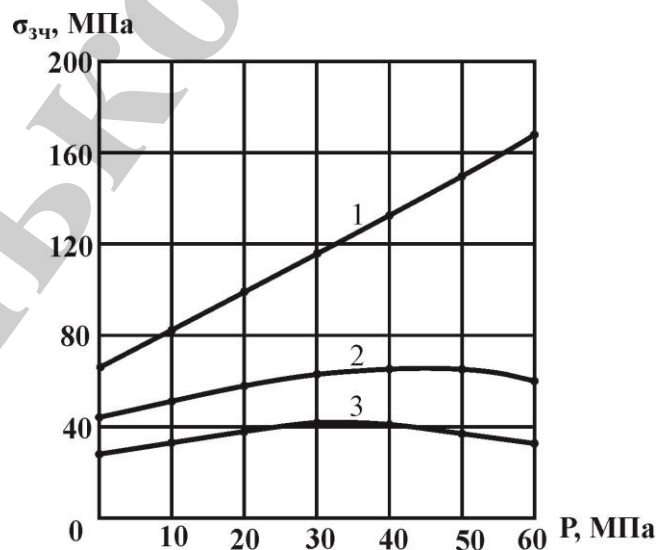


Рис. 7. Залежність міцності зчеплення напилених покриттів від тиску на електроді при струмі зміцнення:
1 – ($I = 14...16$ кА); 2 – ($I = 11...14$ кА); 3 – ($I = 8...10$ кА)

Наступним етапом досліджень було визначення міцності зчеплення покриттів в залежності зміни сили струму зм'ягчення.

Дослідження показали, що максимальних значень міцності зчеплення покриття досягають при силі струму 16-18 кА (рис. 8). Це обумовлено зміною кристалічної ґратки при їх спіканні.

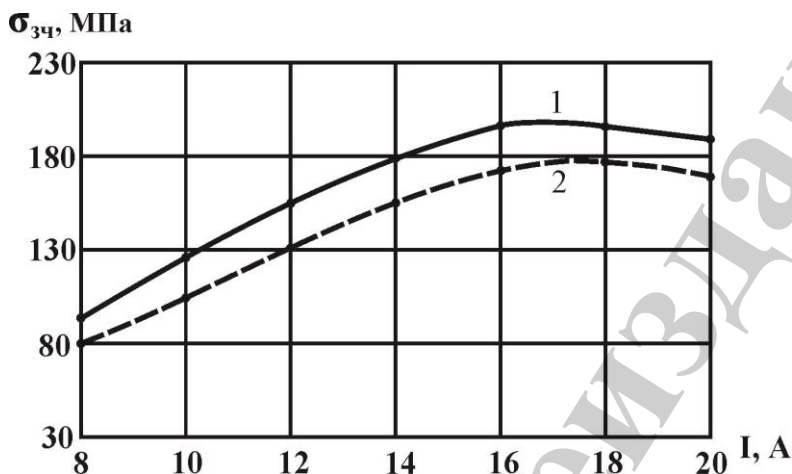


Рис. 8. Залежність міцності зчеплення покриттів від струму зм'ягчення (при тиску ЕКЗ $P=40$ МПа, товщині порошкового шару $d=2$ мм), 1 – ПГ-С1, 2 – ФМІ-2

Випробування зразків на зносостійкість проводились на установці тертя (рис. 5), відповідно, з напиленими покриттями і покриттями, отриманими з використанням комбінованої технології за стандартами ГОСТ 23.208–79 і ASTM C 568. Експериментальні зразки, розміри яких становлять 30×30 мм і товщиною 4,0 мм випробували при швидкості ковзання 0,158 м/с і навантаженні 20 кг. Данні дослідження заносили у таблицю, за якою бували графіки залежності вагового зносу від шляху тертя.

Дослідження зносостійкості покриттів з ПГ-С1 і ФМІ-2 показало, що зі збільшенням струму зм'ягчення знос знижується, причому характер цієї зміни якісно узгоджується із залежністю від режимів ЕКЗ. Зносостійкість покриттів, отриманих за комбінованою технологією, у всьому діапазоні досліджених навантажень і швидкостей виявилася вищою (поз. 3, 4, рис. 9). Зносостійкість же покриттів, отриманих окремо за технологіями газополуменового і електродугового напилення, поступається запропонованій технології з електроконтактним зм'ягченням (поз. 1, 2, рис. 9).

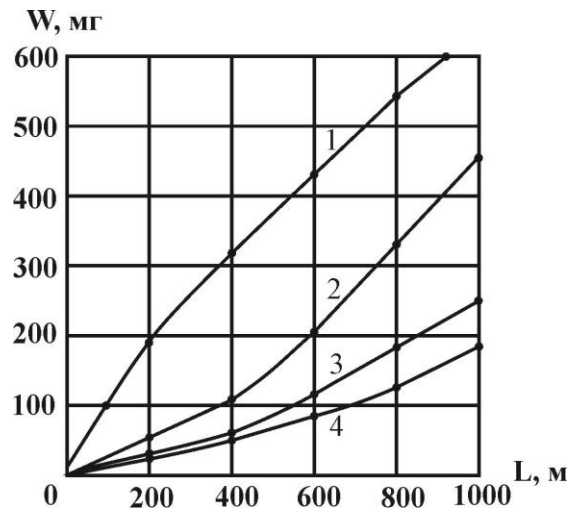


Рис. 9. Залежність вагового зносу (W) від шляху тертя (L): 1 – покриття з матеріалу ПГ-С1; 2 – покриття з матеріалом ФМІ-2; 3 – покриття з матеріалу ПГ-С1 отримане комбінованою технологією; 4 – покриття з матеріалу ФМІ-2, отримане з комбінованою технологією

Зносостійкість покриттів в значній мірі визначається мікроструктурою. Електроконтактне зміцнення дозволяє зберегти в напилених покриттях так звану спадкову структуру вихідного порошкового матеріалу. Так, при отриманні покриття з порошку сплаву ПГ-С1 високі швидкості металу при розпилюванні призводять до утворення дрібнозернистої структури.

Не менш важливими характеристиками матеріалу є втомні властивості. У випадку втомленості тріщини зароджуються і ростуть до значних розмірів без будь-яких помітних змін форми конструкцій.

Межу витривалості досліджуваних зразків визначали на трьох партіях: вихідні зразки 3 без покриття (матеріал сталь 45); зразки 2 з електродуговим покриттям; зразки 1 з покриттям, отриманим комбінованою технологією. Результати випробувань наведені на рис. 10.

В процесі випробувань при інтенсивних вигинах зразки з покриттями поводяться нестійко через розтріскування і відшарування покриттів. Когезійне розтріскування для покриттів, отриманих напиленням, починається після 10^5 циклів, а для напилених покриттів з електроконтактним зміцненням – після 10^6 циклів. Розтріскування передуює частковому відшаруванню покриття. В процесі відшарування амплітуда коливань збільшується. Момент адгезійного відшарування окремих ділянок покриття точно фіксується за зміною резонансної частоти. Момент руйнування основи фіксується різким зменшенням амплітуди коливань і різкою зміною резонансної частоти. Зовнішнім проявом руйнування вимірюваного зразку є зменшення сили і частоти звуку.

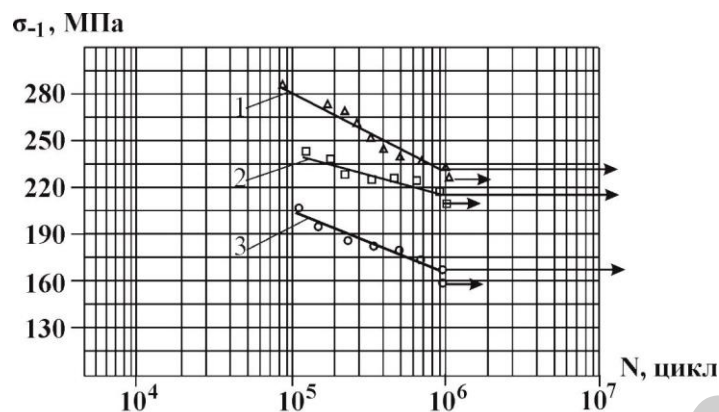


Рис. 10. Результати випробувань зразків з покриттям на втомну міцність:

1 – з покриттям, отриманим комбінованою технологією;

2 – з напиленим покриттям; 3 – без покриття

З порівняння кривих можна зробити висновок, що покриття отримані комбінованою технологією підвищують межу витривалості напилених покриттів на 20 % і без покриттів на 50 %. При недостатній когезійній і адгезійній витривалості покриття причиною підвищення межі витривалості основи слід вважати поверхневу зону термічного впливу.

6. Обговорення результатів досліджень властивостей, отриманих комбінованою технологією

Особливості ущільнення і нагріву напиленого покриття при подальшому його електроконтактному зміцненні забезпечують отримання покриттів з рівномірним розподілом фізико-механічних властивостей по всій поверхні.

На рис. 11, 12 наведені фізико-механічні властивості покриттів, отриманих напиленням і комбінованою технологією, а також порівняння.

З порівняльного аналізу видно, що ЕКЗ дозволяє отримувати практично безпористі напилені покриття з високою міцністю зчеплення.

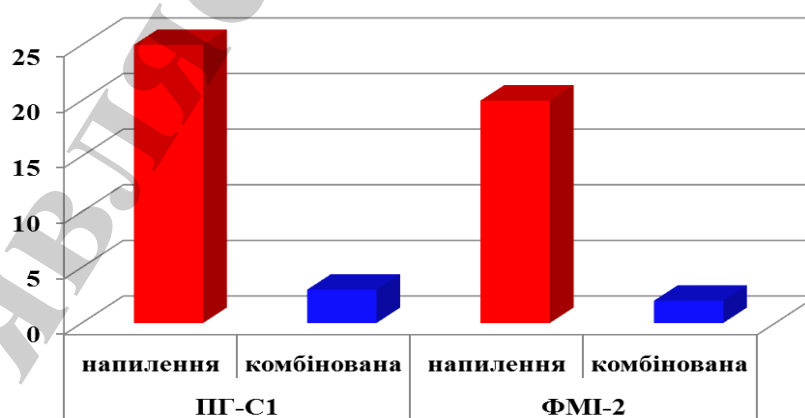


Рис. 11 Порівняння пористості покриттів, отриманих різними технологіями, %

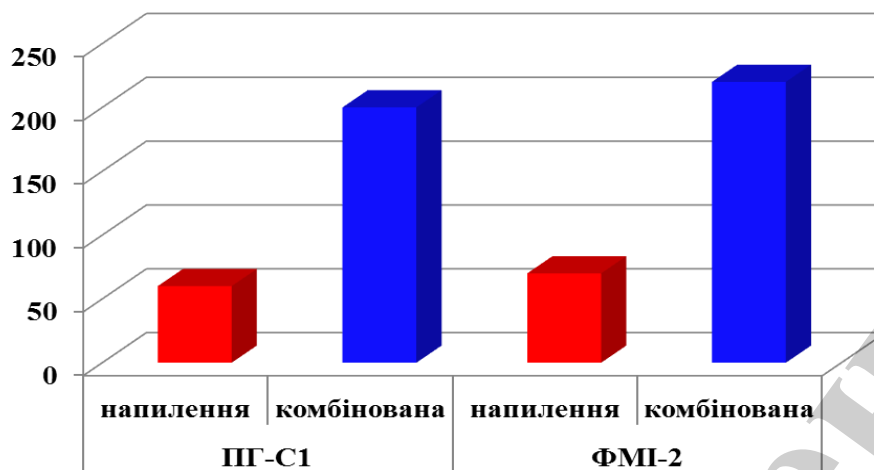


Рис. 12. Порівняння міцності зчеплення покриттів, отриманих різними технологіями, МПа

Такі результати досягаються тим, що в процесі електроконтактного зміцнення відбувається перезагартування поверхневого шару, що призводить до збільшення його мікротвердості. Високий відпуск підповерхневих шарів металу сприяє зменшенню поверхневого шару.

У глибоких шарах в процесі електроконтактного зміцнення відбувається розпад залишкового аустеніту і збільшення мікротвердості шару. Це обумовлено високою концентрацією вуглецю в шарі і мартенситним перетворенням залишкового аустеніту в покритті.

Якість захисту і контроль за експлуатацією обладнання зі зміцненими деталями показує, що масове застосування у виробництві дозволить істотно скоротити тривалість і трудомісткість ремонтних робіт. Крім того, це дозволить збільшити термін служби устаткування, підвищити ефективність та рентабельність виробництва.

Позитивний вплив сумісної дії температурного та силового факторів дозволяє використовувати дану технологію для відновлення деталей в різних галузях промисловості.

Перевагами даного дослідження є те, що використання комбінованої технології дозволяє відновити деталі типу «вал» сільськогосподарської техніки з величиною зносу більш 1 мм. Крім того, даною технологією можливо наносити будь-які матеріали, в тому числі крихкі та матеріали з низькою теплостійкістю.

Але є об'єктивні труднощі, які пов'язані з необхідністю використання різнопланового обладнання. Тому існує велика кількість технологічних параметрів, від яких залежать фізико-механічні та експлуатаційні властивості відновлених поверхонь деталей машин.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на визначення оптимальних режимів ЕКУ при відновленні деталей з наперед заданими фізико-механічними та експлуатаційними властивостями. Використання комбінованої технології відновлення деталей дозволяє перенести отримані результати на деталі, що працюють в різних технологічних середовищах.

7. Висновки

1. Досліджено технологію електроконтактного зміцнення напилених покриттів, її особливості і вплив параметрів процесу на властивості зносостійких покриттів. Встановлено, що зі збільшенням тиску зміцнення до 30–40 МПа і сили струму до 14–16 кА зростання міцності зчеплення напиленого покриття підвищується, і складає 180...220 МПа. Зворотна залежність спостерігається з пористістю напилених покриттів. Так, зі збільшенням тиску зміцнення пористість для вибраних матеріалів зменшується і складає 2...5 %.

2. Зносостійкість покриттів, отриманих комбінованою технологією, у всьому діапазоні досліджених навантажень і швидкостей виявилася вищою, ніж у покриттів, отриманих класичною технологією напилення.

3. Електроконтактне зміцнення дозволило підвищити межу витривалості напилених покриттів на 20 %.

4. Порівняння результатів досліджень процесу нанесення покриттів за класичною та комбінованою технологією отримання зносостійких покриттів, дозволяють стверджувати, що при тиску 20...40 МПа, силі струму 11...16 кА, тривалості імпульсів струму і пауз 0,02...0,04 с, значно підвищилися фізико-механічні та експлуатаційні властивості нанесених покриттів.

Література

1. Воловик Е. Л. Справочник по восстановлению деталей. Москва: Колос, 1983. 51 с.
2. Покрyтия и их использование в технике / под ред. В. Т. Троценко // Прочность материалов и конструкций. Киев: Академперіодика, 2006. С. 981–1074.
3. Takadoun J., Miner J. Wear-corrosion behaviour of some metals // JOM: Metals and Mater. Soc. 2000. Vol. 52, Issue 11. P. 131.
4. Таратута А. И., Сверчков А. А. Прогрессивные методы ремонта машин. Минск: Ураджай, 1986. 376 с.
5. Medvedeva N., Radko O. Management and control of quality parameters of wear-resistant coatings // Problems of friction and wear. 2014. Issue 1 (62). P. 100–103.
6. Sukhenko Y., Miedviedieva N., Sukhenko V. Analysis and choice of coatings for increasing the durability of parts of diffusion units of sugar plants // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 6, Issue 12 (90). P. 27–34. doi: 10.15587/1729-4061.2017.119296
7. Солнцев Ст. С. Розененкова В. А., Миронова Н. А. Полифункциональные защитные технологические покрытия для металлов и сплавов // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2012. № 6. С. 28–30.
8. Сухенко Ю. Г., Литвиненко О. А., Сухенко В. Ю. Надійність і довговічність устаткування харчових і переробних виробництв. Київ, 2010. 547 с.
9. Медведева Н. А., Лопата Л. А., Корж В. Н. Перспективы развития инженерии поверхности деталей машин // Техніка в сільсько-господарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. 2001. Вип. 10. С. 3–5.

10. Improvement of sprayed coatings with ultra high voltage EB melting / Michio T., Nobuyuki A., Junij M., Akio Ya., Yoshiaki A. // Trans. JWRI. 1992. Vol. 21, Issue 2. P. 229–300.
11. Кадырметов А. М. Исследование процессов плазменного нанесения и упрочнения покрытий и пути управления их качеством // Научный журнал КубГАУ. 2012. № 81 (07). С. 1–18.
12. Подчерняева И. А. Лазерное оплавление газотермических покрытий на основе кортинита // Технология и организация производства. 2012. № 3. С. 43–50.
13. Звягинцева А. В. Модифицирование поверхностного слоя деталей сплавами Ni–В для машиностроительного оборудования // Мир техники и технологий. 2005. № 11. С. 42–45.
14. Белый Л. В. Инженерия поверхностей конструкционных материалов с использованием плазменных и пучковых технологий. Минск, 2017. 457 с.
15. Mahdavinejad R. A., Mahdavinejad A. ED machining of WC–Co // Journal of Materials Processing Technology. 2005. Vol. 162-163. P. 637–643. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2005.02.211
16. Научные технологии машиностроительного производства: Физико-химические методы и технологии / под ред. Б. П. Саушкина. Москва, 2013. 928 с.
17. Selvan C. P., Rammohan N., Hk S. Laser Beam Machining: A Literature Review on Heat affected Zones, Cut Quality and Comparative Study // European Journal of Advances in Engineering and Technology. 2015. Vol. 2, Issue 10. P. 70–76.
18. Белоцерковский М. А. Рациональное активирование процессов газопламенного напыления металлов и полимеров // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В: Промышленность, прикладные науки. 2014. № 3. С. 22–28.
19. Solid-state additive manufacturing and repairing by cold spraying: A review / Li W., Yang K., Yin S., Yang X., Xu Y., Lupoi R. // Journal of Materials Science & Technology. 2018. Vol. 34, Issue 3. P. 440–457. doi: 10.1016/j.jmst.2017.09.015
20. Харламов Ю. А., Полонский Л. Г. Газотермическое напыление // Современное состояние и перспективы развития. 2016. № 2 (226). С. 5–19.
21. Лопата Л. А., Савченко Н. А. Повышение качества металлизационных покрытий // Високі технології в машинобудуванні. 2001. Вип. 1 (4). С. 175–179.
22. Порошковые проволоки систем FeCrB+Al и FeCrB+Al+C для электродуговой металлизации / Похмурский В. И., Студент М. М., Довгунук В. М. и др. // Автоматическая сварка. 2002. № 3. С. 32–35.
23. Установка для дослідження зразків матеріалів на термомеханічну втому: Пат. № 2489 UA. МПК: G01N 3/00 / Ляшенко Б. А., Трапезон О. Г., Бондар А. В., Мірненко В. І., Рутковський А. В. № 2003076427; заявл. 09.07.2003; опубл. 17.05.2004, Бюл. № 5.